

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL EXTREMO AGUAS ARRIBA DEL
EMBALSE DE RIBARROJA (RÍO EBRO)**

Ernest Bladé i Castellet, Marina Arbat Bofill, Martí Sánchez-Juny, Josep Dolz Ripollés

*Instituto FLUMEN, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Universitat Politècnica de Catalunya
Jordi Girona 1-3, Edificio D1, 08034 Barcelona, España
ernest.blade@upc.edu, marina.arbat@upc.edu, marti.sanchez@upc.edu, j.dolz@upc.edu*

Guillermo Cobos Campos

Ingeniería 75, Madrid, España, gcobos@spesa.es

Lorenzo Polanco Fernández

Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza, España, lpolanco@chebro.es

RESUMEN:

El módulo de transporte de sedimentos en suspensión implementado en el modelo bidimensional Iber (Instituto FLUMEN, GEAMA y CEDEX) se aplica al estudio de la dinámica sedimentaria del último tramo del río Segre, afluente del río Ebro. Con el modelo Iber se realiza el estudio del transporte de sedimentos en suspensión y la evolución del fondo a lo largo del tiempo; a partir de las condiciones hidrodinámicas (calados y campo de velocidades en dos dimensiones) se obtienen las zonas de erosión/deposición, así como la concentración de sedimento. Con el modelo calibrado, se estudió la estabilidad del cauce en el tramo del río Segre comprendido entre la confluencia con el río Ebro y un kilómetro aguas arriba de la población de Mequinenza, donde se pretende construir un espigón para proteger la zona del campo de regatas de la sedimentación.

ABSTRACT:

The suspended sediment transport module implemented in the two-dimensional Iber model (GEMA, CIMNE and FLUMEN Institute) is used to simulate the sediment dynamics of the last reach of Segre river, a tributary of Ebro river. Iber model can predict the evolution of sediment transport and river bed from hydrodynamic variables (depths and velocity fields in two dimensions). Results showing areas of erosion/deposition and sediment concentration can be obtained. Once the model was calibrated, sediment dynamics were modeled along the reach of Segre River between the confluence with Ebro River and a point situated one kilometer upstream of the town of Mequinenza, where a breakwater is planned to protect a rowing race channel.

PALABRAS CLAVES:

IBER, RÍO EBRO, MODELO NUMÉRICO, TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN.

INTRODUCCIÓN

La confluencia de los ríos Ebro y Segre se produce justo aguas abajo de la presa de Mequinenza, ya dentro de la cola del embalse de Ribarroja de Ebro. Por encargo de Ingeniería 75 y propuesto por la Confederación Hidrográfica del Ebro, el Grupo Flumen de la Universitat Politècnica de Catalunya realizó el estudio de la hidrodinámica y la dinámica sedimentaria de la cola del embalse de Ribarroja para el estudio de la estabilidad del campo de regatas de la población de Mequinenza.

El estudio se realizó con el módulo de transporte de sedimento del modelo numérico Iber (www.iberaula.es), desarrollado por el Instituto FLUMEN (CIMNE, UPC), y el GEAMA (Universidade da Coruña) con el patrocinio del CEDEX (Bladé et al., 2009).

OBJETO

El objeto del estudio era analizarla dinámica sedimentaria para el tramo de río Segre comprendido entre la confluencia con el río Ebro y un kilómetro aguas arriba de la población de Mequinenza, dónde se pretende construir un espigón para proteger el campo de regatas de la sedimentación.

Debido a las características del sedimento en la zona del estudio (López et al., 2010; Grupo de investigación Flumen, 2009) se consideró oportuno estudiar el transporte de sedimento en suspensión y no el transporte por arrastre de fondo. Se desarrolló un nuevo módulo de transporte de sedimentos en suspensión implementado en el modelo Iber. Se utilizaron datos reales de batimetrías del tercio superior del embalse de Ribarroja de Ebro realizadas en 2007 y 2008 (Arbat et al., 2010; Grupo de investigación Flumen, 2009) para la calibración del módulo de transporte de sedimentos y poder utilizarlo para el estudio de la evolución hidrodinámica del tramo final del Segre (en el entorno de la población de Mequinenza).

DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMERICO

Iber es una herramienta de simulación numérica de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. Consta de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico (constituyente de la base de Iber), se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de Saint Venant 2D). El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. En la versión actual se incluyen un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y un modelo k- ϵ .

El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo. Estas ecuaciones son empíricas, obtenidas para casos particulares, por lo que los resultados obtenidos con ellas serán sólo válidos para el análisis de tendencias.

El módulo de transporte de sedimentos en suspensión utiliza los campos de velocidades, calados y de turbulencia proporcionados por los módulos hidrodinámico y de turbulencia (Bladé et al., 2009). El transporte de sedimentos en suspensión se modela mediante una ecuación promediada en profundidad:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hU_x C}{\partial x} + \frac{\partial hU_y C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\Gamma + \frac{\nu_t}{S_{c,t}} \right) h \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + (E - D) \quad [1]$$

donde C es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad, U_x , U_y son las dos componentes de la velocidad horizontal promediadas en profundidad, ν_t es la viscosidad turbulenta, Γ es el coeficiente de difusión molecular de sólidos en suspensión, y $S_{c,t}$ el número de Schmidt (relaciona el coeficiente de difusión turbulenta de momento con el coeficiente de difusión turbulenta de sólidos en suspensión). Los términos D_{sx} , D_{sy} corresponden a la dispersión de sedimento en suspensión debido a la no homogeneidad del perfil de velocidades y de concentración de sedimento en la dirección vertical. Normalmente su efecto se desprecia en los modelos 2D de aguas someras. E y D modelan respectivamente la puesta en suspensión de sólidos que se encuentran en el fondo (resuspensión de sedimento) y la deposición de sólidos en suspensión en el fondo del lecho. Su diferencia representa un balance, y por lo tanto un acoplamiento, entre carga de fondo y carga en suspensión. El cálculo de la evolución morfológica se realiza, resolviendo la ecuación de conservación del sedimento (ecuación de Exner) que considera la variación de la cota de fondo debido al gradiente del caudal sólido y también la Erosión (E) y deposición (D). La primera depende de la concentración de equilibrio:

$$E = W_s C_a^* \quad [2]$$

donde W_s es la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas y C_a^* la concentración de sólidos instantánea. Mientras que la deposición depende de la velocidad de sedimentación de las partículas y la concentración de materia en suspensión:

$$D = \alpha W_s C \quad [3]$$

dónde α es un el cociente entre la concentración cerca del fondo y la concentración media en la profundidad).

Para suelos cohesivos se ha implementado en Iber la formulación de Ariathurai y Arulanandan (1978); en ella se hace depender la erosión de la diferencia entre la tensión tangencial (τ_b) y una tensión tangencial crítica de inicio de erosión (τ_c), así como de un valor M_2 representativo de la tasa de erosión (que sería la tasa de erosión cuando $\tau_b = 2\tau_c$):

$$E = M_2 \cdot \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad [4]$$

La velocidad de sedimentación de las partículas se calcula en función de su diámetro (D_{50}) como (Van Rijn, 1987):

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{R \cdot g \cdot D_{50}^2}{18 \cdot \nu} & \rightarrow D_{50} < 10^{-4} \text{m} \\ W_s &= \frac{10 \cdot \nu}{D_{50}} \left(\sqrt{1 + 0.01 \cdot D_*^3} - 1 \right) & \rightarrow 10^{-4} \text{m} < D_{50} < 10^{-3} \text{m} \\ W_s &= 1.1 \cdot \sqrt{R \cdot g \cdot D_{50}} & \rightarrow 10^{-3} \text{m} < D_{50} \end{aligned} \quad [5]$$

donde D^* es el diámetro adimensional

CALIBRACIÓN

Entre finales de octubre y principios de noviembre de 2007 se realizó una campaña batimétrica de precisión mediante sonda multihaz y a partir de ella se obtuvo el modelo digital del fondo. Para el tercio superior del embalse de Ribarroja (donde tiene lugar la entrada del río Segre), en diciembre de 2008 se realizó una nueva batimetría de los primeros 10 kilómetros de embalse. Mediante la comparación de las dos batimetrías se pudo cuantificar el sedimento acumulado/erosionado a lo largo del periodo, así como analizar su distribución espacial (Arbat et al., 2010). En la Figura 1 se puede observar que en los 4000 m situados inmediatamente aguas abajo de la entrada del Segre se produjo un volumen de erosión sensiblemente igual al que se sedimentó en los 3000 m siguientes. Un volumen de unos 170.000 m³ de sedimento fue desplazado unos 4 km aguas abajo. En el periodo comprendido entre ambas batimetrías el único episodio de avenida importante se presentó en el Ebro entre finales de mayo y principios de junio de 2008, con un caudal medio diario máximo de 1600 m³/s, siendo superior a los 500 m³/s durante unos 12 días. La avenida fue únicamente en el Ebro, el Segre no aportó sedimento que pudiera reponer el que se había movilizó aguas abajo de la confluencia. El módulo de transporte de sedimento en suspensión se ha calibrado con el modelo digital de la batimetría de 2007, los parámetros del sedimento de la zona de la confluencia (López et al., 2010) y el hidrograma de la avenida de mayo-junio de 2009, para que los resultados después de la avenida fueran similares a los obtenidos con la batimetría realizada en 2008 (Arbat et al., 2010). Se calibró tanto con la magnitud de las profundidades de erosión/deposición (del orden de pocas decenas de centímetros) como con la distribución espacial (Figura 2) del sedimento. Los valores estimados de los parámetros fueron $M_2=0.000005$ m/s y $\tau_c=1$ N/m².

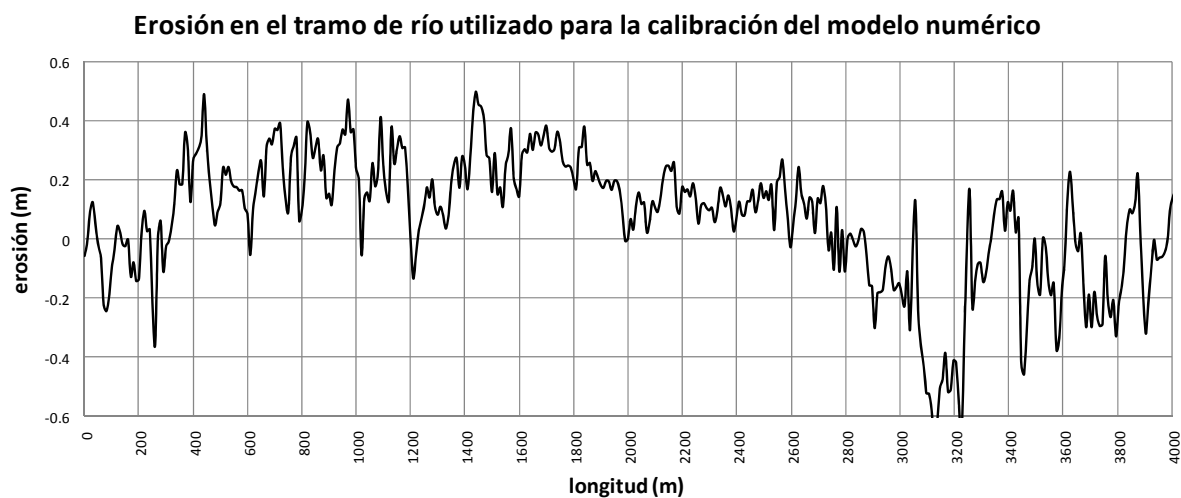


Figura 1.- Diferencia de los dos modelos digitales del fondo de embalse (batimetría 2008 – batimetría 2007). Erosión para los primeros 4000 m y deposición aguas abajo.

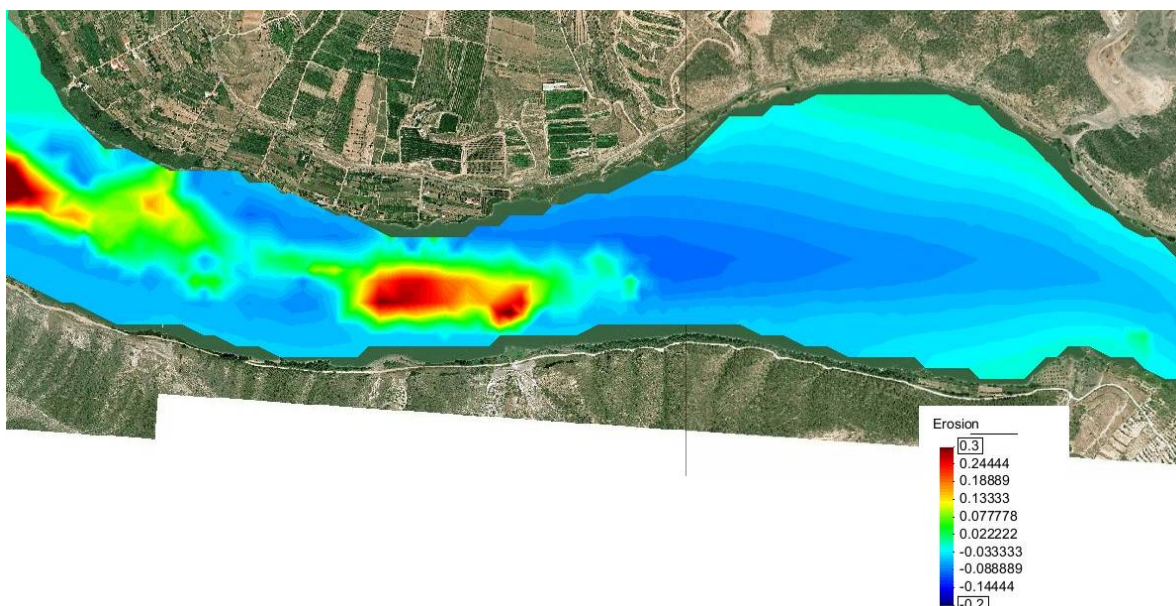


Figura 2.- Valores de erosión (positivos) y sedimentación (negativos) resultantes de la modelización numérica de la avenida de mayo-junio de 2008.

ZONA DE APLICACIÓN

Con el modelo calibrado se simuló la hidrodinámica y la dinámica sedimentaria para el tramo del río Segre comprendido entre la confluencia con el río Ebro y un kilómetro aguas arriba de la población de Mequinenza (la zona de estudio se puede observar en la Figura 3), dónde se pretende construir un espigón para proteger de la sedimentación la zona del campo de regatas. Se simularon distintas geometrías y longitudes de espigón para varios caudales de avenida y distintos niveles de embalse, y se compararon con la situación actual.

Los trabajos de medida del fondo del embalse se realizaron en agosto de 2009, siguiendo la misma metodología que en las campañas batimétricas 2007 y 2008 (Arbat et al., 2010; Grupo de investigación Flumen, 2009). Para el tramo de estudio se utilizaron dos ecosondas (multi y monohaz de doble frecuencia) instaladas en una barca. Para la obtención de la batimetría del fondo del embalse se realizaron medidas por perfiles transversales al río y a lo largo de todo su recorrido. Para la obtención de la topografía del fondo se realizaron varios perfiles transversales y longitudinales a lo largo de la zona de estudio, mediante ecosonda monohaz (Figura 3, en negro). Posteriormente para estudiar en detalle la zona de circulación del agua se realizó una segunda pasada con sonda multihaz, que se centró en el cauce principal del río (Figura 3, en rojo).

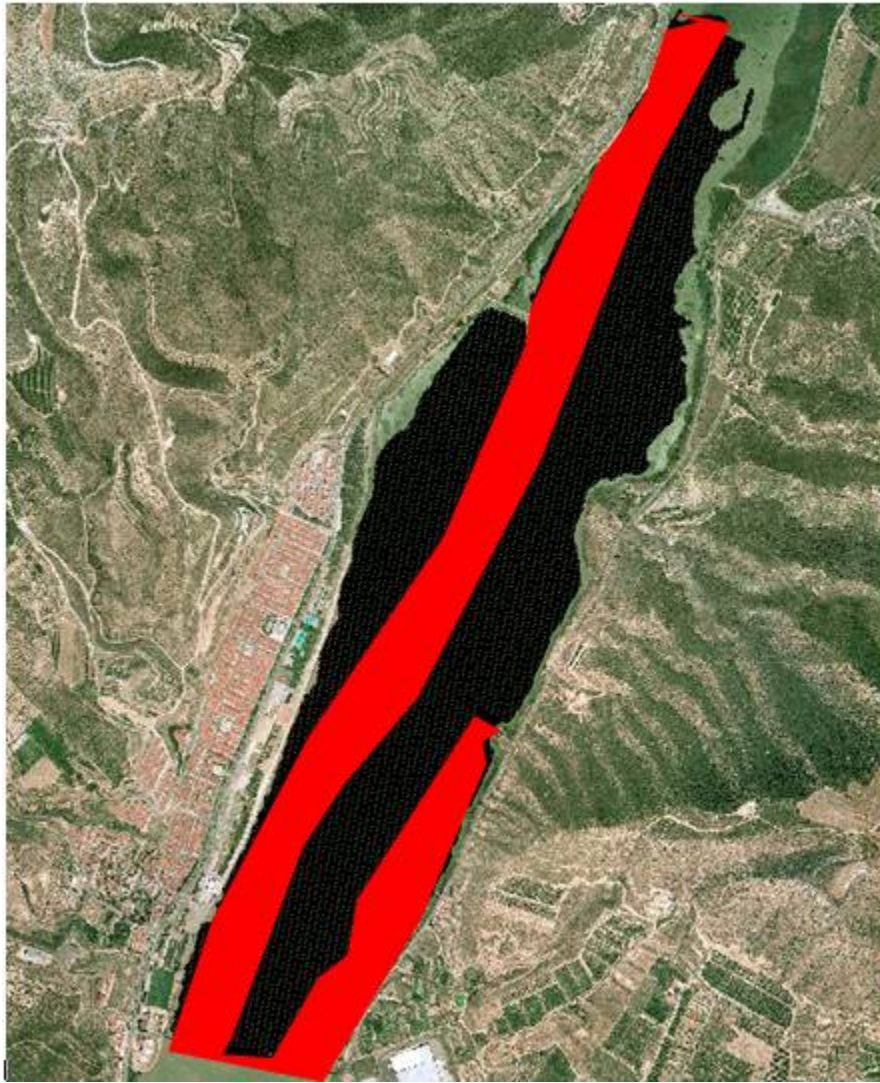


Figura 3.- Distintas fuentes de datos. En malla 5x5 m en la zona en negro y malla 1x1 en rojo en el canal.

Finalmente se unieron los dos ficheros de las ecosondas y se depuraron los datos erróneos; obteniendo una malla regular de puntos de 5x5 m y de 1x1 m en la zona de más detalle del canal (Figura 3). Para el tratamiento de datos se utilizaron los formatos ráster y TIN en función de los requerimientos del estudio y posteriormente, mediante ArcMap de ESRI se unió el modelo digital del embalse realizado en 2007 con el modelo digital del Segre; el resultado se puede ver en la Figura 5.

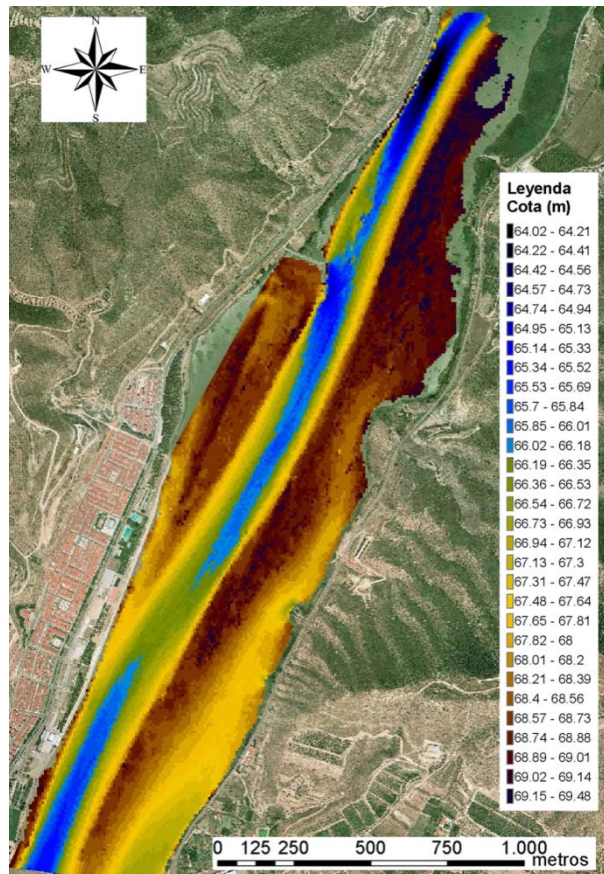


Figura 4.- Detalle de la batimetría del río Segre en la zona de estudio.

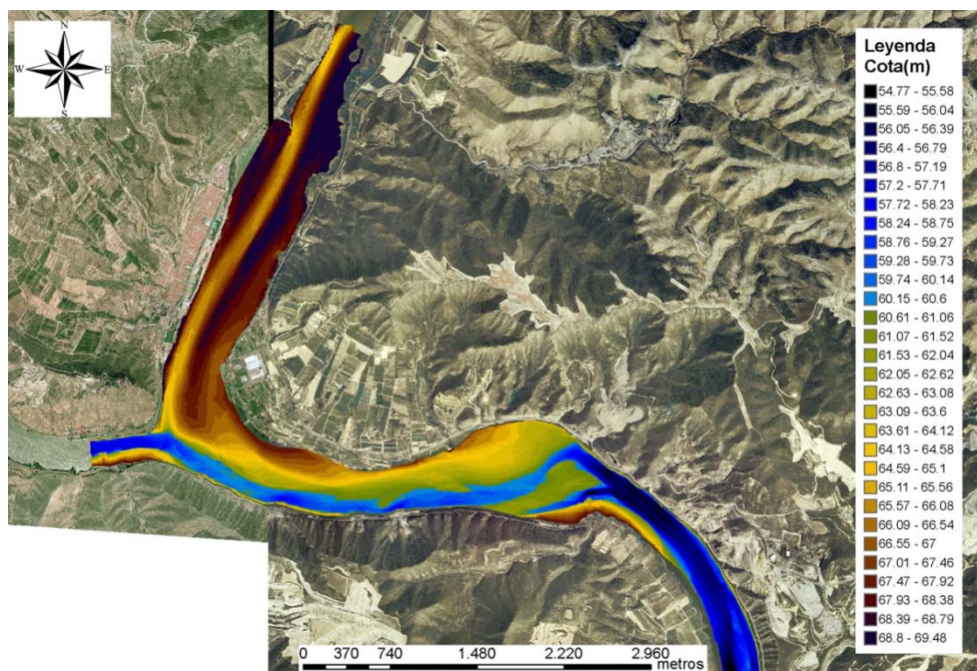


Figura 5.- Unión del modelo digital del embalse de Ribarroja de Ebro (2007) con el modelo digital del Segre en el entorno de Mequinenza.

ESTUDIO DE ACTUACIONES

Se definieron 16 casos de estudio diferentes correspondientes a diferentes combinaciones de longitudes de espigón, caudales del río Segre y cotas de embalse. Las longitudes del espigón estudiadas fueron las tres que se muestran en la Figura 6 (700 m, 900 m y 1100 m), intentando afectar en la menor medida posible el cauce principal del río bien definido en la batimetría, además

de la situación actual con un espigón transversal en la zona aguas arriba (Figura 6, en negro) para comparación.

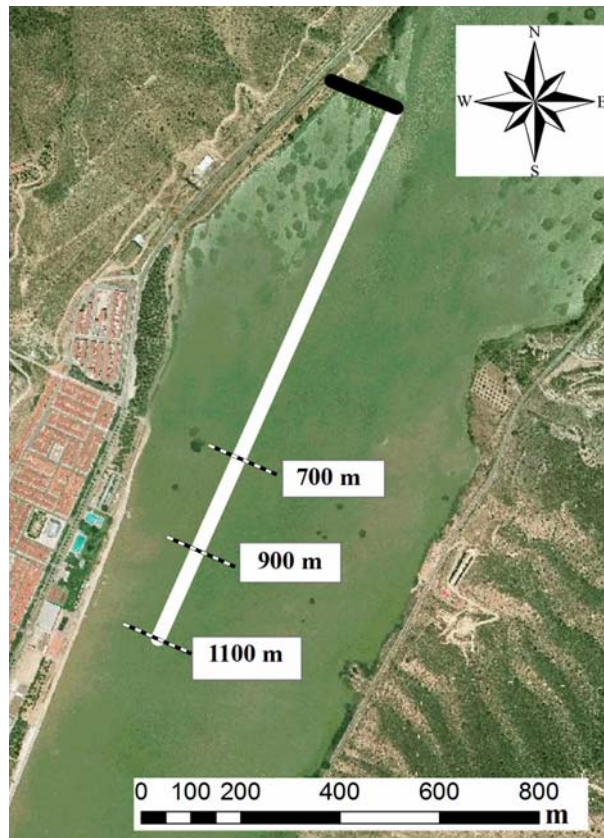


Figura 6.- Longitudes de espigón simuladas. En negro el espigón actualmente existente; en blanco la traza del futuro espigón a construir.

Se consideraron dos caudales diferentes: el correspondiente a un periodo de retorno de 10 años ($2682 \text{ m}^3/\text{s}$) y otro significativamente menor, aunque también importante para el río Segre, de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Referente a las cotas del embalse, se propusieron dos niveles de agua: uno correspondiente a la cota media de embalse, la 69.50 m (el embalse de Ribarroja es muy estable en cuanto a niveles de agua); y otro correspondiente a la cota de 68.80 m ; que es el mínimo que permite asegurar un calado de 2 m (según la normativa vigente, calado necesario para el buen funcionamiento del canal de regatas) en la zona interna del espigón.

A partir del modelo digital del terreno para cada una de las geometrías se construyó una red irregular de triángulos (TIN), que se utilizó como malla de cálculo en Iber. Para las diferentes geometrías de espigón, se consideró que la cota de la zona interior al espigón era constante de 66.80 m (propuesta en el diseño). En la Figura 7 se presenta un detalle de la malla para el espigón de 700 m .

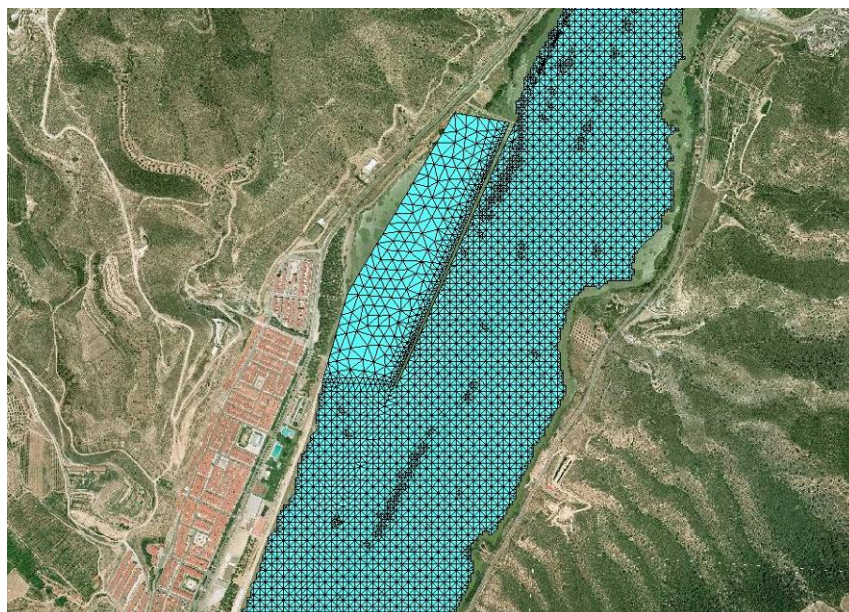


Figura 7.- Detalle de la malla irregular de triángulos para el caso del espigón de 700 m.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

En primer lugar se simuló la hidrodinámica del río Segre para cada una de las 16 combinaciones de geometría, caudal y condiciones de contorno presentadas anteriormente, y suponiendo fondo fijo, es decir, lecho no erosionable. Ello permitió conocer el detalle de calados, valores de acción hidrodinámica y campo de velocidades. De los resultados del cálculo hidrodinámico se desprende que, en la situación actual (Figura 8), existe claramente una zona de flujo preferente que coincide con la de máximo calado (coincidiendo también prácticamente con el cauce profundo del modelo digital (Figura 4).

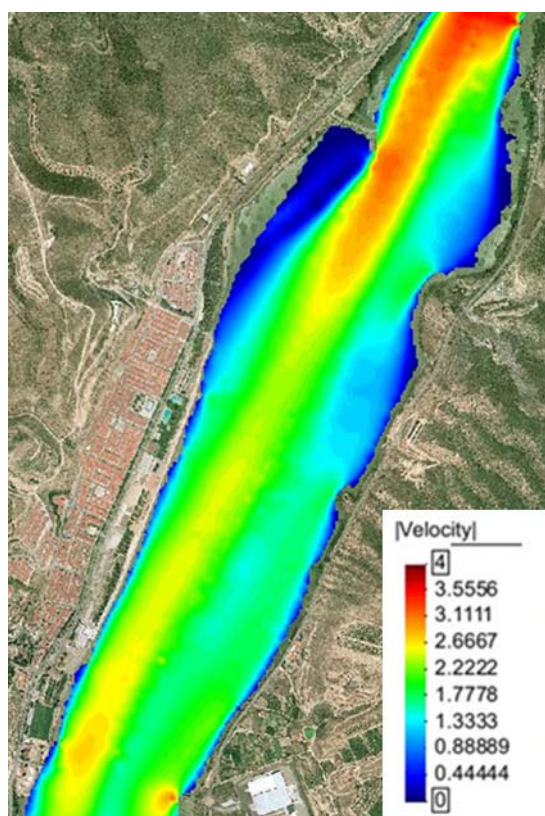


Figura 8.- Detalle del campo de velocidades para la situación actual, cota de embalse a 69.50 y caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$. Velocidades en m/s.

Los calados y los valores de la velocidad varían con el caudal y el nivel de embalse, pero en todos los casos estudiados se aprecia que la presencia del espigón transversal separa el flujo de la margen derecha hacia el centro del cauce, en un tramo de unos 700 o 800 m, y aguas abajo del mismo el cauce principal vuelve a situarse muy próximo a la margen derecha como se aprecia en la Figura 8 (para el caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$ se aprecian velocidades máximas cerca del extremo del espigón de unos 3 m/s). Para el embalse a la cota 68.8 m el patrón general del flujo es muy similar a la del embalse alto (69.50 m) aunque los valores de velocidad aumentan ligeramente.

En cuanto a la influencia del espigón longitudinal, se observa que la longitud de espigón que produce una menor alteración del flujo es el espigón de 700 m (Figura 9, izquierda) y en cambio, el espigón de 1100 m (Figura 9, derecha) tiene suficiente longitud para afectar al trazado cauce principal. A más longitud de espigón se provoca una reducción del ancho del río; y las velocidades, la acción hidrodinámica (capacidad de arrastre) y los caudales específicos tienden a aumentar con la longitud del espigón. Se produce una recirculación dentro del recinto que protege el espigón. El caso de 700 m deja más apertura de entrada; lo que, juntamente con el giro del cauce principal, genera velocidades de recirculación interior algo más elevadas en este caso que en los de 900 m o 1100 m de longitud de espigón. En el caso de 700 m de longitud de espigón, el vórtice de recirculación abarca prácticamente toda la zona interna al espigón; en cambio en el caso de 900 m el vórtice se sitúa en los 650 m aguas abajo del recinto, dejando una zona de aguas más quietas junto al espigón transversal. Lo mismo ocurre para el caso de 1100 m , en que la zona de sombra es de unos 500 metros .

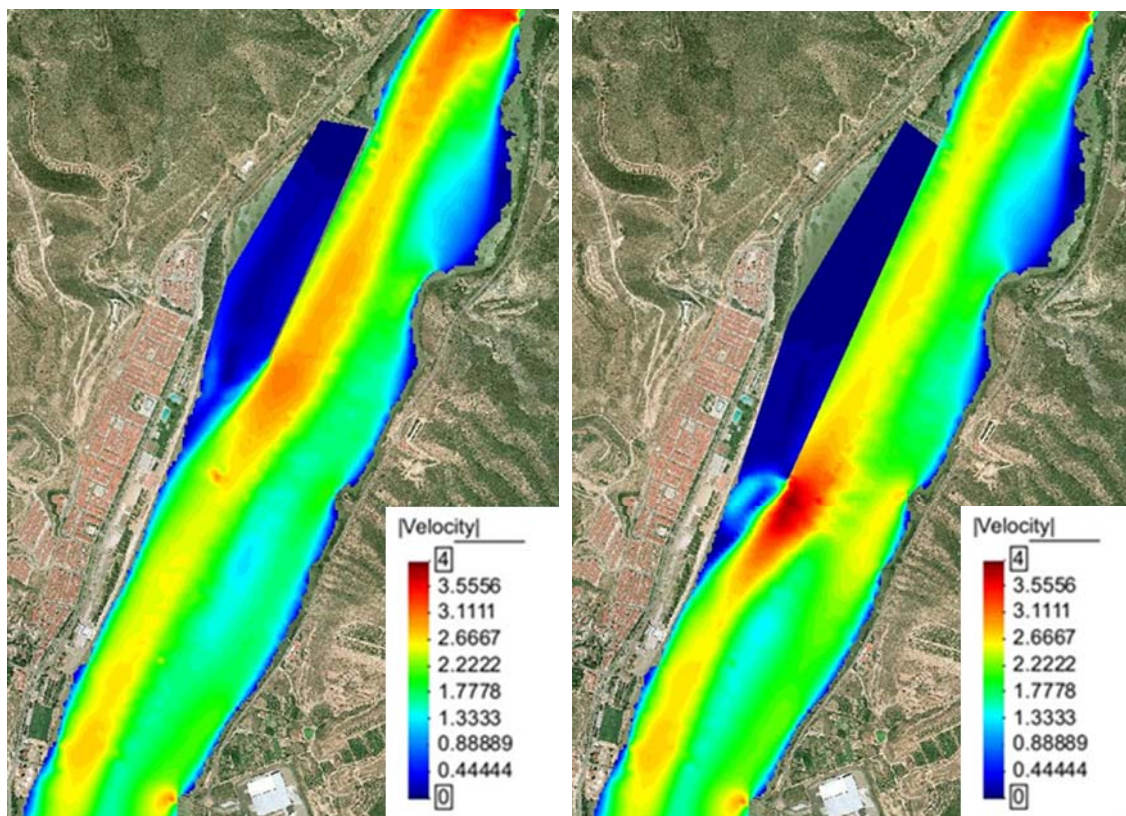


Figura 9.- Detalle del campo de velocidades para los casos de longitudes de espigón de 700 m (izquierda) y 1100 m (derecha), cota de embalse a 69.50 y caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$. Velocidades en m/s (misma escala que para la Figura 8).

RESULTADOS DEL ANÁLISIS MORFODINÁMICO

Las mismas 16 combinaciones de geometrías, caudales y condiciones de contorno se estudiaron a continuación suponiendo lecho móvil. Los resultados del análisis morfodinámico indican que las

tendencias son bastante similares para todos los casos con el caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, y también para todos los casos con el caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$, pero los patrones de erosión y sedimentación son diferentes para caudales distintos. Las distintas cotas de embalse tienen influencia en los resultados en menor medida (a menor cota de embalse las velocidades son mayores, y por lo tanto también las erosiones). El estudio se realizó para un caudal constante durante 24h.

Para $500 \text{ m}^3/\text{s}$, en la situación actual se producen erosiones en la zona del cauce central desde el inicio del tramo de estudio hasta aguas abajo del núcleo urbano de Mequinenza (Figura 10). El material erosionado en esta zona es depositado en parte a ambos lados del mismo cauce central y el resto aguas abajo, donde se producen sedimentaciones en todo lo ancho del cauce aunque mayoritariamente en la margen izquierda. En los resultados se puede observar la tendencia de estas avenidas con caudales moderados a colmar el actual campo de regatas.

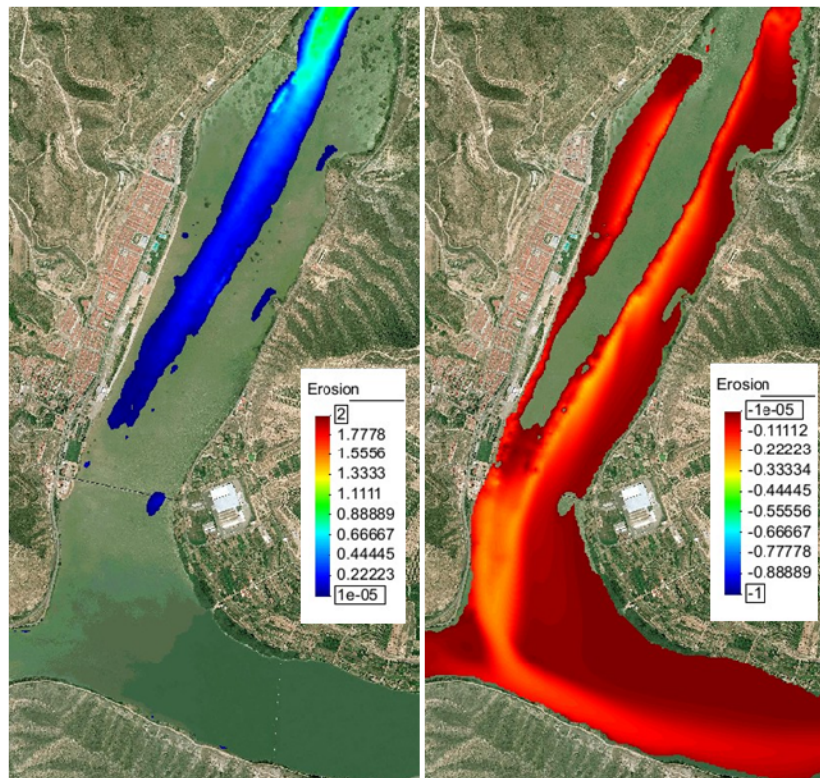


Figura 10.- Erosión (izquierda) y sedimentación (derecha) en la situación actual para el caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (24 horas) y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

Para el espigón de 700 m (Figura 11), la tendencia general es parecida, aunque la presencia del espigón altera ante la sedimentación en las proximidades de la margen derecha. Se observa que en esta margen la sedimentación disminuye de forma considerable dentro de la zona protegida por el espigón, pero aumenta considerablemente aguas abajo del mismo. Existe cierta sedimentación en la zona inferior del área protegida, por la entrada de sedimentos por la bocana debido a las recirculaciones que se producen, pero sobre todo una tendencia a formarse una barra significativa junto a la margen derecha pero aguas abajo del espigón (detalles en la Figura 12, para los casos extremo de 700 m y 1100 m de longitud de espigón). El volumen total erosionado en la zona mostrada es aproximadamente de unos 150.000 m^3 . De estos, aproximadamente una tercera parte se deposita aguas arriba del puente de Mequinenza, mientras que el resto (100.000 m^3) se depositará en lo que se puede considerar ya el cauce del río Ebro.

Los resultados del cálculo morfodinámico reafirman, en definitiva, que el espigón de 700 m es el menos invasivo pero que el tramo de estudio está sometido a importantes cambios morfológicos. La presencia del espigón puede limitar estos cambios en la zona interior al recinto, pero la parte de campo de regatas exterior al mismo necesitará un mantenimiento a largo plazo.

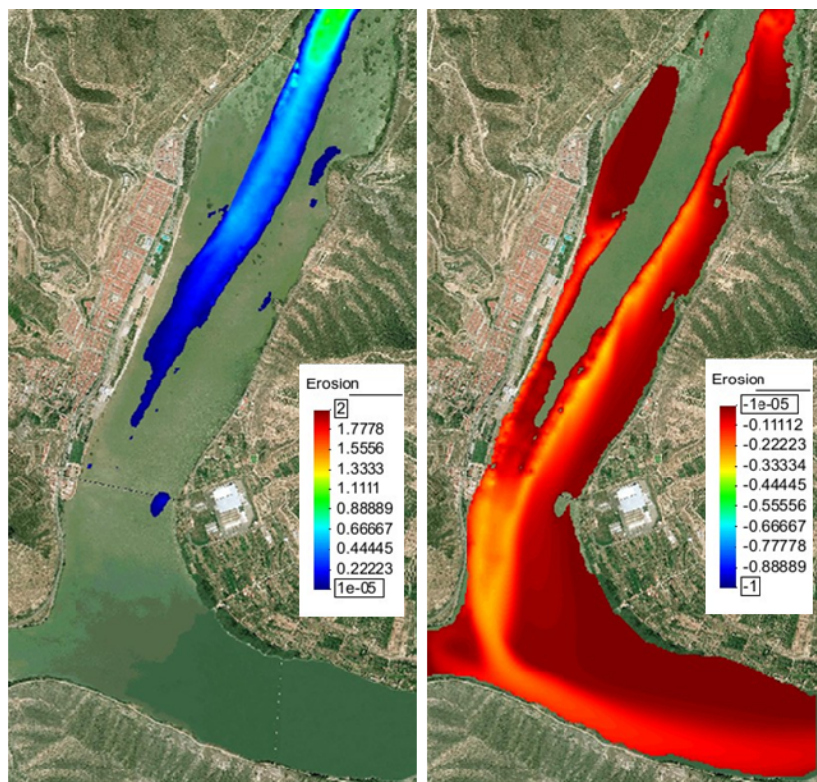


Figura 11.- Erosión (izquierda) y sedimentación (derecha) en el caso de espigón de 700 m de longitud para el caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (24 horas) y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

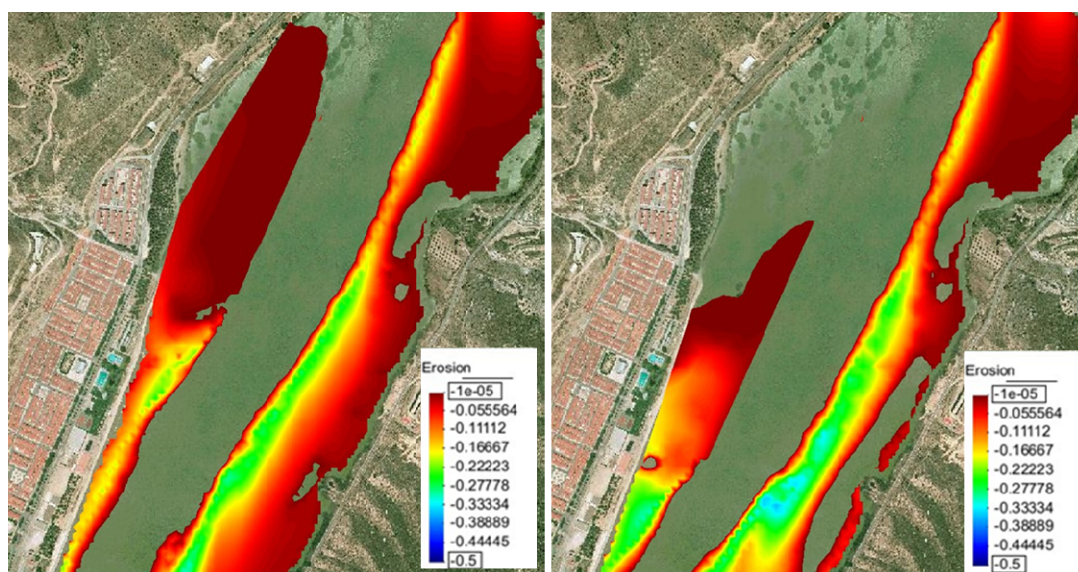


Figura 12.- Detalle de la sedimentación en la parte interna del espigón (para los casos de 700 m y 1100 m de longitud), para un caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (24 horas) y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

Para un caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$ (10 años de periodo de retorno), la magnitud de las velocidades es considerablemente superior en toda la zona correspondiente al río Segre, de manera que la superficie sujeta a erosiones fuertes también es mucho mayor. En la situación actual se puede observar (Figura 13) que prácticamente toda la zona correspondiente al río Segre está sujeta a erosiones, mientras que el sedimento se deposita una vez se ha alcanzado el cauce del río Ebro y concretamente en la margen izquierda del mismo. La tendencia a formar una barra de sedimento aguas abajo del espigón se muestra también para estos caudales grandes, así como la entrada de

sedimentos dentro del recinto debido al retroceso del agua. La magnitud de la barra es similar para cualquier longitud de espigón, así como el área de recinto afectada por sedimentaciones (Figura 14).

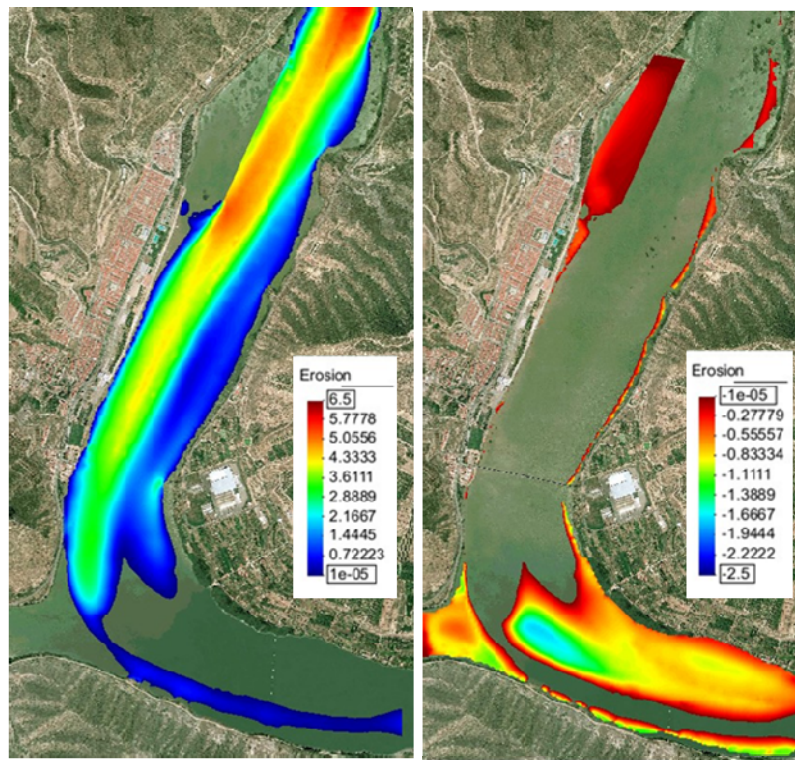


Figura 13.- Erosión (izquierda) y sedimentación (derecha) en la situación actual para el caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$ (24 horas) y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

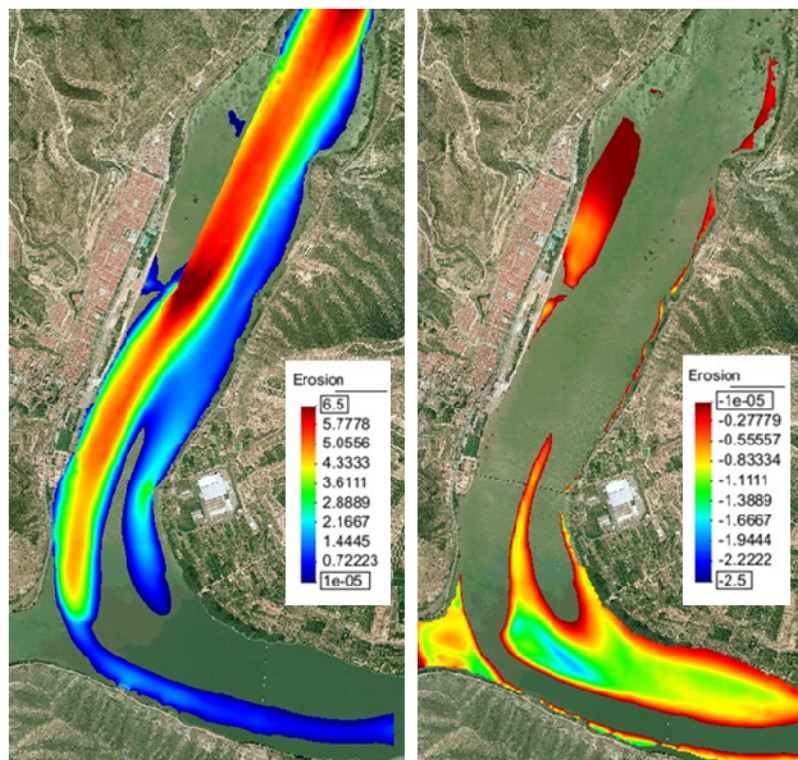


Figura 14.- Erosión (izquierda) y sedimentación (derecha) en el caso de espigón de 700 m de longitud para el caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$ (24 horas) y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

CONCLUSIONES

La posibilidad de realizar una calibración del modelo bidimensional con transporte en suspensión gracias a las batimetrías realizadas en distintos momentos y el conocimiento del detalle de las avenidas ocurridas entre ellas. La comparación numérico-experimental pone de relieve las posibilidades de la formulación utilizada (modelo numérico bidimensional, esquemas en volúmenes finitos, formulación de Ariathurai y Arulanandan para el equilibrio del fondo) para reproducir la dinámica sedimentaria en un entorno fluvial con sedimento cohesivo.

Una vez calibrado el modelo, el análisis hidrodinámico permite evaluar la incidencia de las distintas actuaciones en cuanto a afección al cauce principal del río e impacto sobre la margen izquierda. Mayores longitudes de espigón provocarían un cambio significativo en la capacidad erosiva en el entorno del extremo aguas abajo del espigón, y también en el resto del cauce.

El análisis con fondo móvil permite conocer la tendencia evolutiva del cauce ante el paso de una avenida. Por un lado se pone de manifiesto la diferencia de patrones evolutivos para caudales de magnitudes distintas, mientras que por otro el estudio permite conocer la tendencia de deposición/erosión en las distintas zonas, el diseño de actuaciones para una mayor estabilidad del campo de regatas, y a su vez la necesidad de trabajos de mantenimiento en puntos concretos.

REFERENCIAS

- Arbat, M. & Bladé, E. & De Pourq, K. & Sánchez-Juny, M. & Dolz, J. & López, P. & Armengol, J. & Jaime, F.** (2010). “Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro)”. *II Congreso internacional de Conservación y rehabilitación de presas 2010*. Zaragoza, España
- Ariathurai, R. & Arulanandan, K.** (1978). *Erosion rate of cohesive soils*. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 104(HY2): 279–283.
- Bladé, E. & Gómez-Valentín, M.** (2006). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Monograph CIMNE N°97. Barcelona: CIMNE.
- Bladé, E., Corestein, G., Cea, L., Lara, A., Dolz, J., Puertas, J. y Balairón, L.** (2009). “Desarrollo de un modelo de simulación de flujo en ríos. Convenios de colaboración CEDEX-UPC-UdeC”. *I Jornadas de Ingeniería del Agua*, Madrid, España.
- Bureau of Reclamation. U.S. Department of the Interior.** (2006). *Erosion and Sedimentation Manual*. EUA
- Casanovas-Bergé, Topógrafos asociados & Grupo de investigación Flumen.** (2007). *Memòria dels treballs realitzats a la batimetria del Pantà de Ribarroja*. Barcelona, España.
- Grupo de investigación Flumen (Dolz, J. & Armengol J. et al).** (2009). *Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja. Informe a petición de la Confederación Hidrográfica del Ebro*. Barcelona, España.
- López, P. & Armengol, J. & Dolz, J. & Arbat, M. & Jaime, F.** (2010). “Caracterización física y química del sedimento superficial del embalse de Ribarroja”. *II Congreso internacional de Conservación y rehabilitación de presas 2010*. Zaragoza, España.
- Roura, M.** (2004). *Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat de l'aigua del riu Ebre*. Tesis doctoral. Barcelona: Facultad de Biología Universidad de Barcelona.
- Van Rijn, L. C.** (1987). *Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport*. Delft Hydraulics Communication No. 382. Delft Hydraulics Laboratory: Delft The Netherlands.
- Vericat, F. & Batalla, R. J.** (2005), “Balance de sedimentos en el tramo bajo del Ebro”. *Rev. C&G* 20 (1-2): 79-90. Barcelona, España.
- Vericat, F. & Batalla, R. J.** (2005), “Sediment transport in highly regulated fluvial system during two consecutive floods (lower Ebro River, NE Iberian Peninsula)”. *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 385-402. Barcelona, España.